

Požární zkouška chování zděných cihelných pilířů zesílených pásky na bázi vysokopevnostních uhlíkových tkanin (CFRP)

Fire Behaviour Test of Brick Masonry Columns Reinforced with High-strength Carbon Fibres (CFRP)

Ing. Radek Zigler, Ph.D.

Ing. Marek Pokorný, Ph.D.

ČVUT v Praze

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

marek.pokorny@fsv.cvut.cz, zigler@fsv.cvut.cz

Abstrakt

Článek se zabývá problematikou chování zděných tlacených konstrukcí zpevněných či stabilizovaných kompozity tvořenými tkaninami na bázi vysokopevnostních uhlíkových vláken a epoxidovou pryskyřicí (CFRP - z angl. Carbon Fibre Reinforced Polymer) v podmínkách normového požáru. V článku je popsána požární zkouška zesílených cihelných zděných pilířů provedená v rámci výzkumného úkolu NAKI DF12P01OVV037 ve sloupové požární peci ve zkušebně PAVUS ve Veselí nad Lužnicí a její vyhodnocení. Zkouška byla provedena na 3 různých cihelných pilířích: (1) zesílený zděný pilíř bez povrchové úpravy zatížený osovou silnou; (2) nezatížený zesílený zděný pilíř opatřený vápennou omítkou; (3) nezatížený zesílený zděný pilíř opatřený vápennou omítkou a požárním intumescentním (zpěňujícím) nátěrem.

Klíčová slova

Zděné pilíře; požární zkouška; CFRP; zesílení; stabilizace.

Abstract

The article deals with the behavior of compressed masonry structures reinforced or stabilized with composite fabrics based on high-strength carbon fibers and epoxy resin (CFRP) during standard fire. The article describes the fire test of reinforced brick masonry columns performed within the research project NAKI DF12P01OVV037 in the fire furnace in PAVUS (Veseli nad Luznici) and its evaluation. The test was performed on 3 different masonry columns: reinforced masonry column without any fire protection or plaster loaded by axial force; unloaded reinforced masonry column with lime plaster; unloaded reinforced masonry column with lime plaster and intumescent (swelling) paint.

Keywords

Masonry columns; fire test; CFRP; reinforcement; stabilization.

1 Úvod

Zamezením předčasného vzniku a rozvoje tahových trhlin ve zdivu pilíře, způsobených kontrakcí a vzájemnou interakcí zdících prvků a pojiva, lze dosáhnout vyššího využití únosnosti zdiva v tlaku v závislosti na pevnosti jeho jednotlivých složek. Vyztužení zděného pilíře ovinutím tkaninou z uhlíkových vláken s vysokým modulem pružnosti ($E_{\text{cfp}}/E_d \in <50; 70>$) a vysokou pevností v tahu (např. $f_{\text{tcfp}} = 980 \text{ MPa}$) vytváří vnější příčné vyztužení tlaceného zdiva, které přebírá příčné tahové napětí ve zdivu a zvětšuje mezní deformaci $\delta_{y,m}$ a mezní zatížení $N_{u,m}$ při porušení. Zděný prvek i přes narůstající vodorovné a svislé deformace (zejména ve střední části) je schopen v důsledku účinku ovinutí kompozitem z vysokopevnostních vláken přenášet narůstající tlakové zatížení,

při němž dochází k postupnému vyčerpání mezní pevnosti jednotlivých složek zdiva [1].

Cílem požární zkoušky provedené v rámci rozsáhlého experimentálního výzkumu NAKI „Progresivní neinvazivní metody stabilizace, konzervace a zpevňování historických konstrukcí a jejich částí kompozitními materiály na bázi vláken a nanovláken“ bylo ověření chování této zesilující úpravy zděných pilířů v podmínkách normového požáru a její alternativní požární ochrana.

Použitý zesilující a stabilizující jednovrstvý kompozitní systém byl tvořen jednosměrnou tkaninou z vysokopevnostních uhlíkových vláken Tyfo SCH-41 a epoxidovou pryskyřicí Tyfo S®. Tento zesilující systém byl aplikován na zděné cihelné pilíře z plných pálených cihel pevnosti P20 zděných na vápennou maltu MV2. Lze konstatovat, že požární odolnost samotné zděné konstrukce je výrazně vyšší, než očekávaná požární odolnost shodné konstrukce včetně staticky aktivovaných zesilujících a stabilizujících vrstev. Klíčovou požárně technickou charakteristikou zděných prvků zesílených kompozitními materiály na bázi vysokopevnostních vláken s matricí tvořenou epoxidovou pryskyřicí (FRP) je kritická teplota epoxidové pryskyřice uváděná v rozmezí od 60 °C [2] do 130 °C [3]. Tyto teploty jsou z požárního hlediska teploty extrémně nízké a v případě zkoušky požární odolnosti dosažené již po prvních minutách. Z tohoto hlediska byla očekávaná požární odolnost zatíženého pilíře zesíleného pomocí CFRP pásek (v aktivním stádiu) bez provedené povrchové úpravy velmi nízká.

Běžně prováděná požární ochrana deskovými obklady, tak jak je to např. běžné u zesilovaných dřevěných, ocelových nebo i betonových konstrukcí (sloupy, trámy, nosníky ad.) není v případě historických zděných konstrukcí možná (zejména u památkově chráněných objektů). Jediným možným způsobem požární ochrany takto zesílených zděných konstrukcí je tedy použití běžných (vápenných) omítek, případně i v kombinaci s aplikací intumescentního nátěru. Požární zkouška tedy měla také přinést odpověď na otázku, zda provedená povrchová úprava či případná aplikace intumescentního nátěru má dostatečný potenciál zajistit určitou požární odolnost zesílených zděných konstrukcí, tj. zda lze dostatečně snížit povrchovou teplotu na úroveň kritické teploty zesilující úpravy.

2 Zkouška požární odolnosti

Požární zkouška byla provedena ve sloupové peci pro zkoušení požární odolnosti nosných sloupů vystavených účinkům požáru ze čtyř stran [4] s průběhem teploty v peci dle normové teplotní křivky [5]. Vnitřní půdorys podlahy pece je tvořen rovnostranným osmiúhelníkem, jehož vepsaná kružnice má průměr 3 m, výška pece je 3 m (obr. 1).

2.1 Předmět zkoušky

Zkoušky požární odolnosti byly provedeny na 3 zděných cihelných pilířích o půdorysných rozměrech 300 x 300 mm výšky 1000 mm vyztužených z plných pálených cihel pevnosti P20 na vápennou maltu MV2. Zesílení všech pilířů bylo provedené pomocí jednosměrné vysokopevnostní uhlíkové tkaniny Tyfo SCH-41 lepené epoxidovou tixotropní pryskyřicí Tyfo S®. Pilíř 1 nebyl dále opatřen žádnou povrchovou úpravou. Pilíře 2 a 3 byly opatřeny vápennou omítkou tloušťky 25 mm provedenou přes

adhezni můstek na epoxidovém kompozitu tvořeném křemičitým pískem aplikovaným do zavádě epoxidové pryskyřice. Na pilíř 3 byl po zaschnutí omítky aplikován penetrační nátěr a následně intumescentní nátěr AITHON A90H (výrobce Aithon Ricerche International Srl; v ČR pod označením Plamostop P9); (obr. 2).



Obr. 1 Otevřená sloupová zkušební pec v požární zkušebně PAVUS, a.s. ve Veselí nad Lužnicí

Intumescentní nátěry jsou obvykle používány pro zvýšení požární odolnosti nosných (event. požárně dělících) dřevěných a ocelových konstrukcí nebo ke snížení hořlavosti (reakce na oheň) povrchových úprav. V poslední době se začínají na trhu objevovat i nátěry aplikovatelné na železobetonové konstrukce, u kterých ekvivalentním principem zvyšují (nahrazují) tloušťku krycí vrstvy výztuže. Princip ochranné funkce lze zjednodušeně popsat tak, že nátěrový systém vystavený působení vysokých teplot (180 až 200 °C) začíná rychle expandovat (až 50× zvětšuje svou původní tloušťku) a karbonizovat [6]. Nevýhodou intumescentních nátěrů je v současné době zejména jejich omezená životnost a následně jejich nutná obnova.



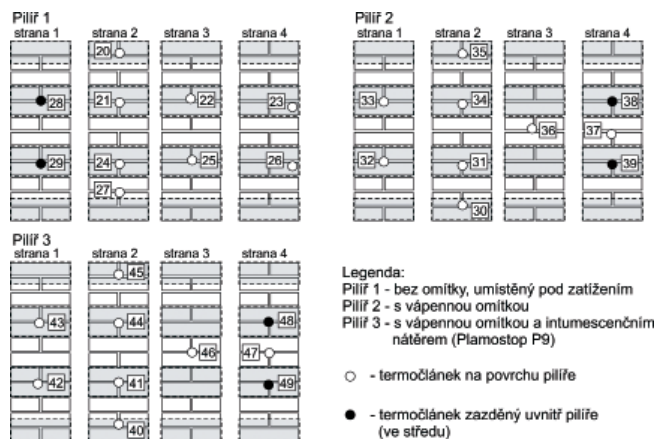
Obr. 2 Zkušební vzorky připravené ve zkušebně



Obr. 3 Pohled do sloupové pece: a) zkušební sestava zatěžovaného pilíře 1; b) pilíře 2 a 3 ve zkušební peci

Pilíř 1 byl v průběhu zkoušky zatěžován osovou silou. Vzhledem k výšce zkušební vzorku (1000 mm) bylo nutné zkušební vzorek „nastavit“ pomocí betonových pilířů rozměrů 400 x 400 x 1200 mm (obr. 3a). Pilíře 2 a 3 byly volně postaveny na podlahu požární pece a nebyly v průběhu zkoušky zatěžovány (obr. 3b).

Zkušební vzorky byly osazeny termoelektrickými články (snímači teploty) dle obr. 4, a to jednak na povrchu prvku (pod zesilující kompozitní vrstvou, případně pod omítkou) a také uvnitř pilíře (v jeho středu). Teplota ve zkušební peci byla měřena deskovými snímači obsahujícími plášťové termoelektrické články (snímače teploty). Dále byla měřena deformace (stlačení) zkušební sestavy pilíře 1.

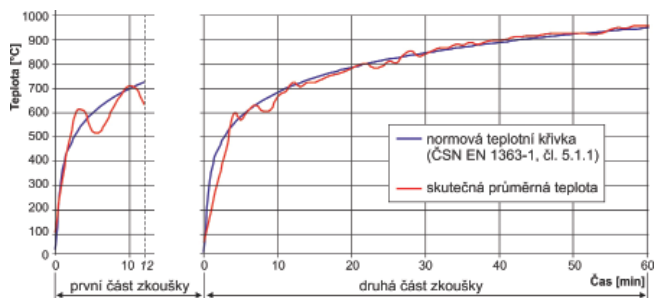


Obr. 4 Osazení zkušebních těles termočlánky

2.2 Průběh zkoušky

Vzorky byly od data zbudování do dne zkoušky uloženy v uzavřeném prostředí zkušební haly, kde jim byly vytvořeny optimální podmínky k vysychání zdiva (teplota vzduchu 21 až 25 °C a relativní vlhkost vzduchu 51 až 54 %).

Před započítím požární zkoušky bylo do pilíře 1 vnášeno postupně narůstající osové zatížení ve stupních po 60 kN (10 % předpokládaného mezního zatížení nezesíleného zděného pilíře) až do vzniku prvních viditelných svislých tahových trhlin (540 kN). Toto zatížení bylo dále udržováno po dobu 15 minut (ustálení zatížení) a následně byla zahájena požární zkouška s průběhem teploty ve sloupové peci dle normové teplotní křivky (obr. 5; [5]).

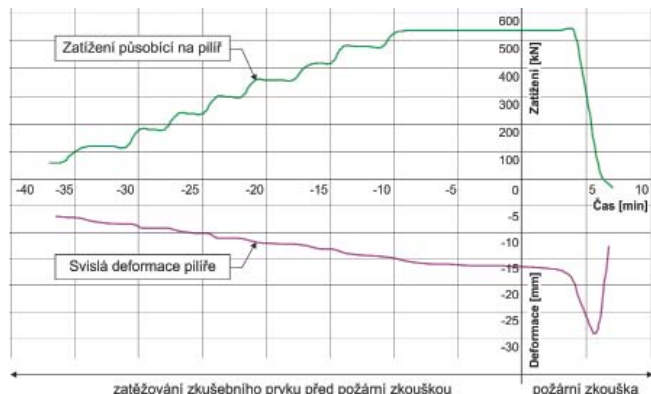


Obr. 5 Normová teplotní křivka a skutečná průměrná teplota v peci: a) první část zkoušky (do kolapsu vzorku); b) druhá část zkoušky

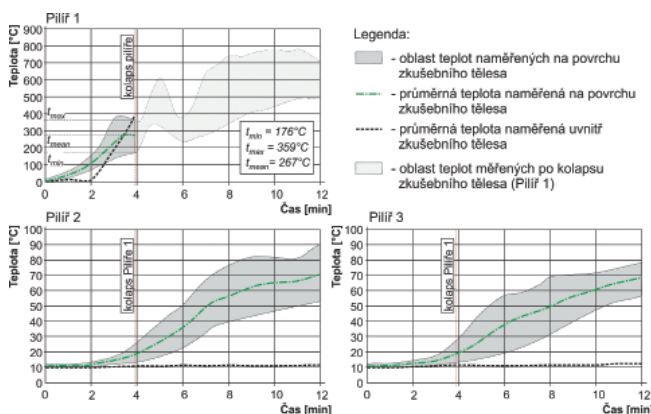
Po 4 minutách od zahájení požární zkoušky (obr. 5a) došlo ke ztrátě únosnosti a stability zatíženého zesíleného pilíře 1 a k jeho náhlému kolapsu. Po 6 minutách došlo k aktivaci pěnicího procesu intumescentního nátěru na pilíři 3. Následně byla požární zkouška krátce přerušena z důvodu nutných technických úprav na požární peci. V navazující části zatěžování teplotou (obr. 5b) byla po 15 minutách pozorována vlivem karbonizace výrazná změna barvy

vytvořené pěny na pilíři 3 a byly pozorovány trhliny ve zpeněném nátěru. Po 54 minutách začala odpadávat vápenná omítka z pilíře 2. Požární zkouška byla ukončena po 60 minutách.

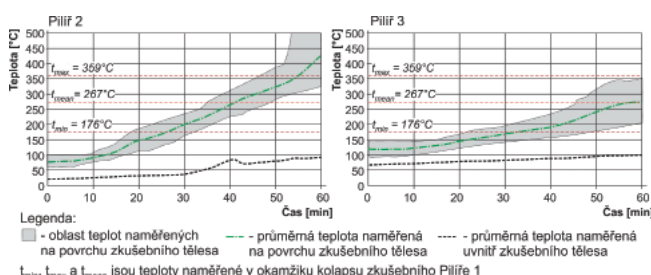
Záznam měřených veličin (posuny, teploty) je patrný z obrázků 6 až 8 [5].



Obr. 6 Průběh zatěžování a deformace zkušební pilíře 1 při požární zkoušce



Obr. 7 Průběhy teplot na povrchu a uvnitř zděných pilířů v první části požární zkoušky



Obr. 8 Průběhy teplot na povrchu a uvnitř zděných pilířů v druhé části požární zkoušky

3 Diskuze výsledků

Provedená požární zkouška zděných cihelných pilířů zesílených kompozitem na bázi vysokopevnostních uhlíkových vláken a epoxidové pryskyřice poukázala na některé závažné skutečnosti, které jsou patrné z uvedených průběhů zachycujících výsledky testů (obr. 5 až 8) a které lze shrnout jednak s ohledem na chování pilířů jako celku (včetně zesilujícího systému) a jednak s ohledem na chování nejslabšího článku systému CFRP (tj. epoxidové pryskyřice) následovně:

Chování pilířů jako celku:

- Zatížený zděný cihelný pilíř 1 (bez omítky) zesílený pomocí CFRP pásků ztratil svoji únosnost již ve 4. minutě normového požáru, tj. při teplotě na povrchu pilíře v rozmezí 200 až 400 °C (teplota v peci cca 450 °C). Kolaps byl náhlý, nepředcházela mu žádný výrazný nárůst svislých deformací pilíře.
- Nezatížený zděný cihelný pilíř opatřený vápennou omítkou (pilíř 2), případně vápennou omítkou a intumescentním nátěrem (pilíř 3) vykazovaly v době kolapsu zatíženého pilíře 1 velmi nízké teploty na povrchu samotného zdiva pod omítkou v rozmezí 10 až 30 °C.
- Po 6 minutách při teplotě v peci cca 500 °C došlo k aktivaci intumescentního nátěru na pilíři 3 a tvorbě uhlíkaté pěny.
- Po 12 minutách se měřená teplota na povrchu zdiva pilířů opatřených vápennou omítkou (pilíř 2), případně vápennou omítkou a intumescentním nátěrem (pilíř 3) pohybovala v rozmezí 50 až 90 °C; teplota v peci byla v tuto dobu cca 700 °C.
- Kritické teploty nad 200 °C, při níž došlo ke kolapsu zatíženého pilíře 1, dosáhl zděný pilíř opatřený vápennou omítkou (pilíř 2) po cca 25 minutách (celý průřez pilíře pak tuto teplotu dosáhl po 35 minutách).
- Kritické teploty nad 200 °C, při níž došlo ke kolapsu zatíženého pilíře 1, dosáhl zděný pilíř opatřený vápennou omítkou a intumescentním nátěrem (pilíř 3) po cca 42 minutách (celý průřez pilíře pak tuto teplotu nedosáhl ani po 60 minutách, tedy v době ukončení požární zkoušky).

Chování nejslabšího článku CFRP systému (epoxidové pryskyřice):

- Na zatíženém pilíři 1 (bez omítky) byla kritická teplota epoxidové pryskyřice cca 100 °C (průměrná hodnota z uvedeného intervalu 60 až 130 °C) dosažena již ve 2. minutě. Dosažením této teploty kolaps pilíře 1 nenastal; ke kolapsu došlo o další 2 minuty později.
- Krátce po zapnutí hořáků byl pozorován rychlý přeskok plamene na povrch zesilující úpravy pilíře 1, čímž byla oblast zesílení následně prohřívána rychleji než zbylé zděné části.
- V první části zkoušky (12 minut) nebyl na nezatížených pilířích 2 a 3 dosažena kritická teplota epoxidové pryskyřice. U pilíře 2 (vápenná omítka) byla dosažena maximální teplota cca 90 °C, u pilíře 3 (vápenná omítka s intumescentním nátěrem) pak cca 80 °C.
- V druhé navazující části zkoušky byla kritická teplota epoxidové pryskyřice u pilíře 2 udržena po dobu dalších 10 minut, u pilíře 3 po dobu 15 minut. Obdobně jako u pilíře 1 lze však předpokládat, že kolaps pilířů by dosažením kritické teploty epoxidové pryskyřice nenastal ihned.
- Lze očekávat též další prodloužení doby do kolapsu nejen vlivem vlastní tepelné izolační schopnosti ochranných vrstev (omítka, intumescentní nátěr), ale též vlivem separační funkce omítky (nedochází k přímému přeskoku plamene na zesilující úpravu) a vlivem omítky na zpomalení procesu tání (měknutí, tečení) epoxidové pryskyřice.

4 Závěr

Provedená zkouška potvrdila v podmínkách normového požáru velmi nízkou účinnost zesilující kompozitní vrstvy (CFRP) tvořené tkaninou na bázi vysokopevnostních uhlíkových vláken a epoxidovou pryskyřicí a tedy nezbytnost jejich požární ochrany, pokud má takto zesílený či stabilizovaný prvek nosnou funkci (na rozdíl např. od stabilizace zděných konstrukcí FRP materiály z důvodu seizmického zatížení). Provedená vápenná omítka výrazně prodloužila dobu (o cca 30 minut), než teplota na povrchu zdiva pilíře dosáhla hodnot, při nichž došlo ke kolapsu zatíženého pilíře. Dalšího výrazného prodloužení této doby bylo dosaženo aplikací intumescentního (zpěňujícího) nátěru na povrchu vápenné omítky.

Na základě provedené požární zkoušky lze tedy konstatovat, že provedení běžné vápenné omítky přes zesilující kompozitní vrstvu pozitivně přispívá ke zvýšení požární odolnosti zesíleného zděného prvku. Provedení intumescentního nátěru na omítnutý povrch pak požární odolnost zvýší.

V současné době je ve fázi základního výzkumu v zahraniční vyvíjen a testován specifický typ modifikované epoxidové pryskyřice, která nemá tendenci tát při tepelném zatížení, ale naopak ve své struktuře postupně povrchově vytvrzovat. Tento typ pryskyřice má velký potenciál právě pro zvýšení požární odolnosti systému CFRP a lze usuzovat, že míra požární ochrany by mohla být redukována např. pouze na úroveň aplikace tradičních materiálů (např. omítek).

Poděkování

Příspěvek byl vypracován za podpory projektu NAKI DF12P01OVV037 "Progresivní neinvazivní metody stabilizace, konzervace a zpevňování historických konstrukcí a jejich částí kompozitními materiály na bázi vláken a nanovláken" poskytnutého Ministerstvem kultury ČR.

Použitá literatura

- [1] Witzany, J.; Čejka, T.; Zigler, R.: *Failure mechanism of compressed short brick masonry columns confined with FRP strips*, Construction and Building Materials, 63, pp. 180-188., 2014, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.041.
- [2] Dohnálek, P.; Karantzakis, J.M. (2011): Použití bazaltového vlákna pro zesílení zdiva a betonu. Sborník *SSBK - Sanace 2011*. Načteno z: <http://www.betonserver.cz/ssbk-bazaltove-vlakno>.
- [3] Technický list STADO CZ (02/2012): *Požární ochrana Stado Carbo systému (CFRP lamely) nehořlavými deskami Grenamat AL*. Načteno z: http://www.stado.cz/images/stories/virtuemart/TL/tk-Stado_Carbo_Grenamat.pdf.
- [4] ČSN 1365-4. (2000) Zkoušení požární odolnosti nosných prvků - Část 4: Sloupy. Praha: ČNI.
- [5] ČSN 1365-4. (2013) Zkoušení požární odolnosti - Část 1: Základní požadavky. Praha: ÚNMZ.
- [6] Heidingsfeld, V.: Zpěnitelné protipožární nátěry. In: Vaněček, I. a O. Kotlíková. *Ročenka STOP 1999*. Praha: Společnost pro technologie ochrany památek, 2000, s. 64-68. ISBN 80-902668-2-7.
- [7] Protokol o zkoušce požární odolnosti č. Pr-13-2.148 pro výrobek „Zděný cihelný pilíř zesílený uhlíkovou tkaninou“ vydaný 20. 12. 2013, Požární zkušebna Veselí nad Lužnicí, zkušební laboratoř č. 1026 akreditovaná ČIA.